

УДК 621.165

В. Н. ГОЛОЩАПОВ, канд. техн. наук, с.н.с.; с.н.с. ИПМаш НАН України, Харків;

О. В. КОТУЛЬСКАЯ, инженер ИПМаш НАН України, Харків;

Т. Н. ПАРАМОНОВА, инженер ИПМаш НАН України, Харків

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ОБОДОМ ДИАФРАГМЫ И КОРПУСОМ ТУРБИНЫ

В работе приведена методика определения граничных условий на поверхностях зазоров между внутренним корпусом и ободом диафрагмы, апробированная при расчете температуры и коэффициентов теплоотдачи для указанных элементов в четвертой ступени ЦВД паровой турбины К-325-23,5 ОАО «Турбоатом» на режиме номинальной мощности. Выбор областей определения граничных условий в зазорах проведен с учетом термических сопротивлений пограничных слоев.

Ключевые слова: турбина, обод диафрагмы, проточная часть, граничные условия, термическое сопротивление.

Введение

Обеспечение надежной работы турбин, проектируемых на высокие начальные параметры пара [1], требует детальной оценки термонапряженного состояния высокотемпературных узлов и деталей, для определения которого необходимо задать граничные условия теплообмена на каждой из поверхностей этих элементов.

К настоящему времени выполнены значительные экспериментальные и численные исследования частично обобщенные в [2], в которых предложены методические подходы к определению граничных условий на поверхностях элементов проточной части, омываемых паром, и критериальные уравнения для их определения. Однако, имеется ряд поверхностей на корпусных элементах, для которых такая информация отсутствует. Это поверхности выточек для обойм во внутреннем и наружном корпусах ЦВД и ЦСД паровых турбин большой мощности.

Целью работы – разработка подхода к определению граничных условий в зазорах между внутренним корпусом и ободом диафрагмы.

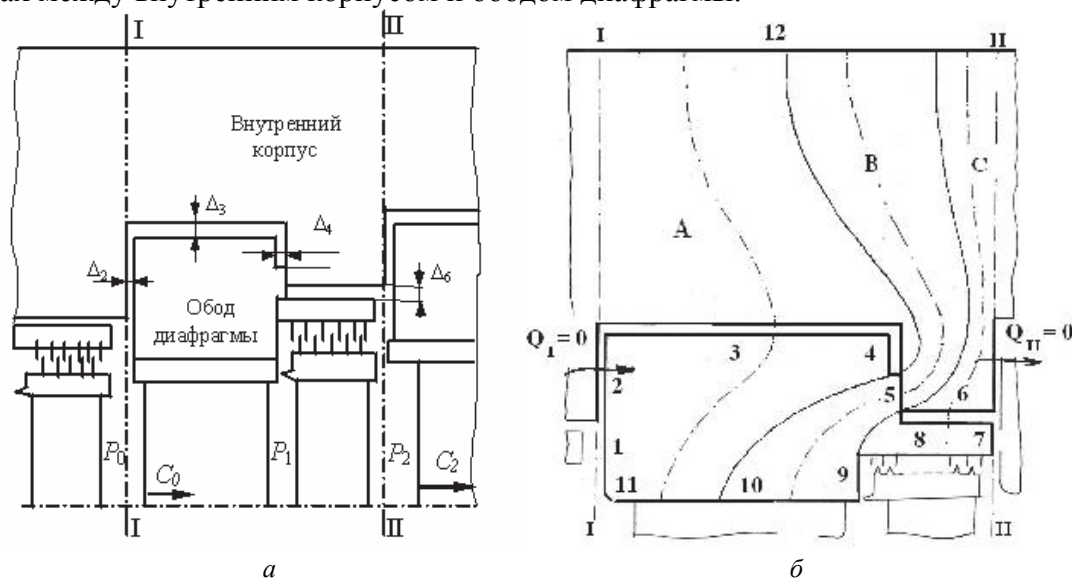


Рис. 1 – Установка диафрагмы в корпусе турбины: а – схема; б – распределение тепловых потоков в ней

© В.Н. Голощاپов, О.В. Котульская, Т.Н. Парамонова, 2015

Распределение тепловых потоков в системе «обод диафрагмы-корпус»

На рис. 1 сечениями *I-I* и *II-II* выделен исследуемый фрагмент цилиндра турбины. Поверхности, через которые проходит тепловой поток, обозначены цифрами от 1 до 12. В сечениях *I-I* и *II-II* тепловой поток в осевом направлении принят равным нулю. Пар, проходящий через проточную часть ступени, нагревает поверхности лопаток, обода и бандажа рабочих лопаток.

Тепловой поток из проточной части через поверхности 1, 10, 11 движется к наружной поверхности корпуса 12. Основное количество тепла к поверхностям обода диафрагмы 10 и 11 подводится от направляющей лопатки и от торцевой поверхности межлопаточного канала. На поверхности 1 тепловой поток формирует паровая струя, поступающая из надбандажного уплотнения предыдущей ступени. Движение пара в щелях, сформированных поверхностями обода диафрагмы и корпуса с номерами 2, 3 и 4, в номинальном режиме работы турбины отсутствует. Максимальный тепловой поток от обода диафрагмы к корпусу поступает через контактную поверхность 5. Тепловой поток, поступающий к наружной поверхности надбандажного уплотнения проходит через козырек, зазор Δ_6 , заполненный паром, внутренний корпус между областью *B* и сечением *II-II* и поступает в паровой поток, омывающий в межкорпусном пространстве наружную поверхность 12 внутреннего корпуса.

Анализ движения теплового потока в ободе диафрагмы и внутреннем корпусе позволяет выделить три области: область *A* – от торцевой поверхности каналов направляющего аппарата к наружной поверхности внутреннего корпуса через зазоры между ободом диафрагмы и корпуса, область *B* – от торцевой поверхности обода диафрагмы через контактную поверхность 5 к наружной поверхности внутреннего корпуса и область *C* – от внутренней поверхности надбандажного уплотнения через козырек и зазор к корпусу.

Приняв такое распределение тепла в системе «обод диафрагмы – корпус» и имея граничные условия на поверхностях 10 и 12 (температуры пара $T_{10}^{\text{пар}}$ и $T_{12}^{\text{пар}}$ и коэффициенты теплоотдачи α_{10} и α_{12} , рассчитанные по критериальным зависимостям, приведенным в [2]), необходимо определить граничные условия на остальных поверхностях с учетом их геометрических характеристик.

Модель теплового потока

Удельный тепловой поток, проходящий через рассматриваемую область при стационарном тепловом состоянии, может быть описан зависимостью

$$q_i = \frac{\Delta T^{\text{пар}}}{\sum_{i=1}^n R_i},$$

где $\Delta T^{\text{пар}} = T_{10}^{\text{пар}} - T_{12}^{\text{пар}}$ – температурный перепад в системе «обод диафрагмы-корпус», определяемый по температуре пара; R_i – термическое сопротивление элемента области *A*, *B* или *C*, которое включает сопротивление тепловых пограничных слоев и твердых элементов.

Аналогично методу теплогидроанalogии для области с переменной площадью поперечного сечения, термическое сопротивление отдельных элементов областей *A*, *B* и *C* можно трактовать как гидравлическое сопротивление при движении потенциального потока жидкости в канале переменного поперечного сечения (рис. 2). При этом разность температур $\Delta T^{\text{пар}}$ является аналогом перепада давления ΔP , тепловой поток Q – аналогом объемного расхода жидкости, а удельный тепловой поток q – аналогом скорости потока жидкости. Термические сопротивления условного канала,

моделирующего области *A*, *B* или *C*, будут аналогами гидравлических местных сопротивлений и сопротивлений трения, зависящих от длины канала.

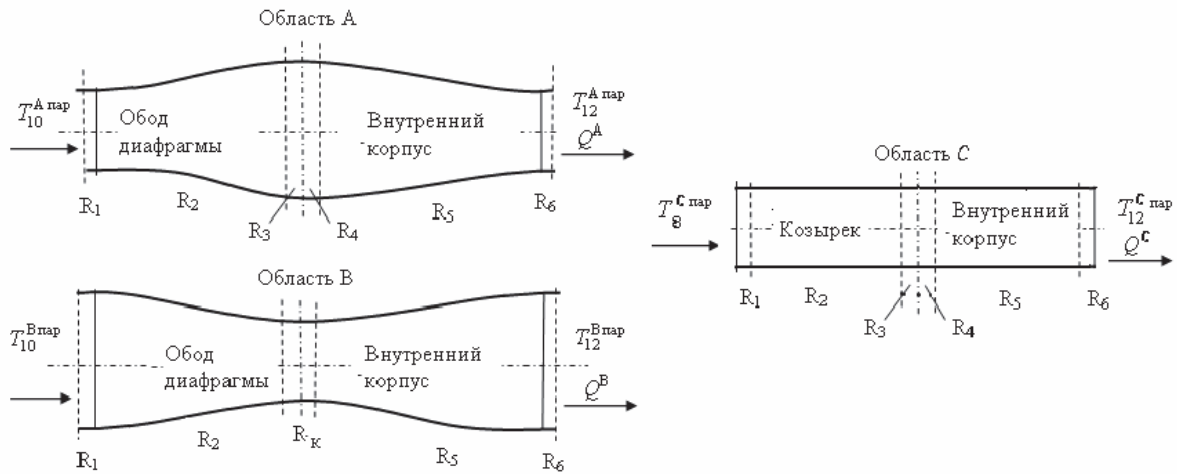


Рис. 2 – Схема аналогов для определения характеристик теплового потока в областях *A*, *B*, *C*

Термические сопротивления, приведенные для каждой из областей на рис. 2, сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Термические сопротивления элементов установки диафрагмы в корпусе

Область	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
R_1	$1/\alpha_{10}$	$1/\alpha_{10}$	$1/\alpha_8$
R_2	$l_{об} / \lambda_{об}$	$l_{об} / \lambda_{об}$	$l_{коз} / \lambda_{коз}$
R_3	$\Delta_3 / 2\lambda_3^{пар}$	–	$\Delta_6 / 2\lambda_6^{пар}$
R_4	$\Delta_4 / 2\lambda_4^{пар}$	–	$\Delta_6 / 2\lambda_6^{пар}$
R_5	$l_{корп} / \lambda_{корп}$	$l_{корп} / \lambda_{корп}$	$l_c / \lambda_{корп}$
R_6	$1/\alpha_{12}$	$1/\alpha_{12}$	$1/\alpha_{12}$
R_k	–	$1/2\alpha_5$	–

В таблице приняты следующие обозначения: α_i – коэффициент теплоотдачи (КТО) на *i*-ой поверхности, λ_i – теплопроводность элемента, *l* – длина линий тока в рассматриваемом *i*-ом твердом элементе, Δ – размер зазоров, заполненных паром. Форма записи термических сопротивлений для зазоров принята в предположении, что конвекция в них не возникает.

Тепловой поток, проходящий через область *B* системы «обод диафрагмы-корпус», отличается от теплового потока, проходящего через область *A*, большей интенсивностью, вызванной наличием низкого термического сопротивления R_k в месте контакта обода (поверхность 5), который прижимается к поверхности выточки во внутреннем корпусе со значительным усилием, создаваемым разностью давления на ободе диафрагмы. Термическое сопротивление в месте контакта обода и корпуса (контактное термическое сопротивление) относится к двум контактирующим поверхностям – обод и диафрагма, т.е. $\alpha_5 = \alpha_5^{об} + \alpha_5^{корп}$. За характеристический размер принимается половина толщины контактного слоя.

Тепловой поток с поверхности 9 целесообразно отнести к области B.

Тепловым потоком с поверхности 7 козырька (из-за отсутствия движения пара в зазоре) можно пренебречь. Коэффициент теплоотдачи α_8 приведен к наружной поверхности надбандажного уплотнения. Теплопроводность материала козырька принимается при температуре пара в зазоре $T_6^{\text{пар}}$.

Результаты определения граничных условий на поверхностях паровых зазоров

Предложенная методика была апробирована при определении граничных условий на поверхностях зазоров между ободом диафрагмы и внутренним корпусом четвертой ступени ЦВД паровой турбины К-325-23,5 ОАО «Турбоатом» на режиме номинальной мощности.

Имея геометрические размеры указанных элементов, рассчитывались площади поверхностей и осредненные длины линии тока теплового потока в ободе диафрагмы и внутреннем корпусе. Из теплового расчета проточной части турбины определялись средние значения температуры, давления и удельного объема в интересующих областях.

Граничные условия в системе «обод диафрагмы-корпус», определенные по зависимостям приведенным в [2], сведены в табл. 2.

Таблица 2.

Параметры пара и коэффициенты теплоотдачи на поверхностях, омываемых паром

Номер поверхности	1	8	9	10	11	12
Давление P_i , МПа	14,80	13,13	13,27	14,04	14,80	6,49
Температура T_i , °С	467	447	447	456	465	344
Коэффициент теплоотдачи α_i , Вт/(м ² ·К)	2738	5493	1707	9331	5562	382

Граничные условия на поверхностях обода диафрагмы 2, 3, 4 и 6 определены согласно приведенной методики. Граничные условия на поверхности 5 отнесены к каждой из опорных поверхностей как $\alpha_5 = \alpha_k/2$ при условии одинаковой шероховатости поверхности.

Изменения температур в ободе диафрагмы в областях A и B, а также козырьке в области C в этом случае определяются из равенства удельных тепловых потоков для каждой области как

$$\Delta T_{об}^j = \Delta T^{\text{пар}} \cdot \frac{\sum R_{об}}{\sum R^j}, \quad \Delta T_{коз}^j = \Delta T^{\text{пар}} \cdot \frac{\sum R_{коз}}{\sum R^j},$$

где $\Delta T^{\text{пар}}$ – разность температур пара возле поверхности 12 и поверхностями 8-10 в проточной части; $\sum R^j$ – сумма термических сопротивлений в областях A, B, C.

Тогда значения температур пара в каждой области будет равно

$$T_3^{\text{сп}} = T_{10}^{\text{пар}} - \Delta T_{об}^A, \quad T_5 = T_{10}^{\text{пар}} - \Delta T_{об}^B, \quad T_6^{\text{сп}} = T_8^{\text{пар}} - \Delta T_{коз}^C,$$

где $T_8^{\text{пар}}$, $T_{10}^{\text{пар}}$ – температура пара возле поверхностей 8 и 10; $T_3^{\text{сп}}$, $T_6^{\text{сп}}$ – средняя температура в зазорах у поверхностей 3 и 6; T_5 – температура контактной поверхности 5.

При определении КТО на поверхностях, создающих паровой зазор, рассчитана температура на средней линии зазоров, для чего определен температурный напор в

зазорах и на контактной поверхности $\Delta T_{06}^A = 51,6$ °С, $\Delta T_{06}^B = 26,1$ °С, $\Delta T_6^{cp} = 50,6$ °С, откуда $T_3^{cp} = 402,4$ °С, $T_5 = 427,9$ °С, $T_6^{cp} = 396,4$ °С.

Тепловой поток через обод диафрагмы и корпус определяется для областей *A*, *B*, *C* с учетом баланса тепла на поверхности *12* внутреннего корпуса, для которой $\alpha_{12} = \text{const}$ и $T_{12} = \text{const}$ путем последовательных приближений. По полученным значениям температур определены значения КТО на поверхностях, формирующих паровые зазоры, которые представлены в табл. 3.

На поверхности 5 термическая проводимость контактного соединения обода диафрагмы 4-й ступени и внутреннего корпуса, рассчитанная по температуре T_5 в соответствии с [3], для рассматриваемого режима работы турбины равна 12540 Вт/(м²·К).

Таблица 3.

Параметры пара и коэффициенты теплоотдачи на поверхностях, формирующих паровые зазоры

Номер поверхности	2	3	4	5	6
Давление <i>P</i> , МПа	14,80	14,80	14,80	–	12,48
Температура <i>T</i> , °С	467	402,4	402,4	427,9	396,4
Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м ² ·К)	42,7	42,7	42,78	6605	39,8

Выводы

Разработан методологический подход к определению граничных условий в узких зазорах между ободом диафрагмы и корпусом, которые заполнены неподвижным паром высоких параметров. Контрольный расчет граничных условий на поверхностях зазоров и контактной поверхности опоры диафрагмы и корпуса позволил определить как коэффициенты теплоотдачи, так и температуру пара в среднем сечении зазора, которые могут быть использованы в качестве исходных данных для расчетов термонапряженного состояния элементов проточной части.

Список литературы: 1. Діагностика, надійність, ресурс парових турбін [Текст] / О. Л. Шубенко, В. П. Сухінін, Т. М. Фурсова, О. Ю. Бояршинов. – Харків : Оперативна поліграфія, 2014. – 152 с. – ISBN 978-966-8354-17-5. 2. Теплообмен в элементах конструкций паровых турбин [Текст] / Ю. М. Мацевитый, С. В. Алехина, В. Н. Голошапов, О. В. Котульская ; под ред. академика НАН Украины Ю. М. Мацевитого. – Харьков: Институт проблем машиностроения, 2012. – 287 с. – ISBN 978-966-02-6322-2. 3. Шлыков, Ю. П. Контактное термическое сопротивление [Текст] / Ю. П. Шлыков, Е. А. Ганин, С. Н. Царевский. – М. : Энергия, 1977. – 328 с.

Bsibliography (transliterated): 1. Shubenko, O. L., et al. *Diagnosis, reliability, resource steam turbines*. Kharkiv : Operativna poligrafija, 2014. ISBN 978-966-8354-17-5. Print. 2. Matsevit, Yu. M., et al. *Heat transfer in structural elements of steam turbines*. Kharkov : Institute for Mechanical Engineering Problems, 2012. ISBN 978-966-02-6322-2. Print. 3. Shlikov, Yu. P., E. A. Ganin and S. N. Tsarevskiy. *Contact thermal resistance*. Moscow : Energiya, 1977. Print.

Поступила (received) 10.02.2015